

Physique quantique

M. Serge HAROCHE, membre de l'Institut
(Académie des sciences), professeur

COURS : SYNTHÈSE, CONTRÔLE ET PROTECTION D'ÉTATS QUANTIQUES

Le cours donné au Collège de France en janvier et février 2011 était intitulé « Synthèse, contrôle et protection d'états quantiques ». La manipulation de systèmes quantiques dans le but de développer des applications pour le traitement de l'information est devenue un domaine très actif de l'optique quantique et de la physique mésoscopique. Dans les cours antérieurs, j'avais étudié des systèmes d'ions piégés et d'atomes couplés à quelques photons dans des cavités en analysant diverses méthodes de préparation, d'estimation et de reconstruction d'états. J'avais décrit la génération et la mesure d'états possédant des propriétés non classiques, tels les états intriqués de plusieurs atomes, les états « chat de Schrödinger » d'un champ piégé dans une cavité, ou encore des états de Fock à nombre de photons bien défini, et j'avais montré comment la décohérence de ces états pouvait être expérimentalement observée.

J'ai décrit cette année des méthodes plus générales de synthèse d'états quantiques arbitraires et abordé le problème du contrôle de la décohérence en décrivant des méthodes de rétroaction (*feedback*) quantique dont le but est de protéger les systèmes quantiques de la décohérence en les maintenant le plus longtemps possible dans un état non classique donné. Une partie importante du cours a été consacrée à la description de systèmes constitués de jonctions Josephson supraconductrices, véritables atomes artificiels dont le développement au cours des dernières années a conduit à la réalisation d'expériences remarquables de synthèse et de reconstruction d'états. J'ai comparé ces expériences à celles réalisées avec des atomes et des photons en optique quantique.

Chaque leçon était accompagnée d'une présentation par ordinateur consultable dès le jour du cours sur le site internet du Collège de France. Les enregistrements audio et vidéos des cours sont également consultables sur ce site.

Un tiers de l'enseignement de la chaire a par ailleurs été donné à l'université fédérale de Rio de Janeiro, dans le cadre de la convention signée en 2009 par le Collège de France et les Académies des sciences de France et du Brésil (création de la chaire Claude Bernard pour des enseignements du Collège de France au

Brésil). Dans ces cours intitulés « *State estimation and reconstruction in quantum information* », j'ai décrit des expériences d'électrodynamique quantique en cavité portant sur la mesure non destructive de photons et la reconstruction d'états non classiques du champ ainsi que des expériences de rétroaction quantique. J'ai également analysé des expériences de mesure et de reconstruction d'états du champ en électrodynamique des circuits, en les comparant avec celles de l'électrodynamique quantique en cavité.

Le cours donné à Paris, réparti sur sept leçons, a traité des points suivants :

1. Rappels des cours antérieurs et présentation du cours de l'année.
2. La physique de la jonction Josephson.
3. Les qubits supraconducteurs.
4. L'information quantique avec des qubits de phase.
5. La synthèse et la reconstruction d'états en électrodynamique des circuits.
6. La manipulation et la synthèse par effet Zénon dynamique des états d'un oscillateur quantique.
7. La préparation et la protection d'états d'un oscillateur harmonique par rétroaction quantique.

Rappels des cours antérieurs et présentation du cours de l'année

La première leçon a commencé par un résumé des cours antérieurs. La notion de qubit, décrit comme un spin fictif évoluant dans la sphère de Bloch, a été rappelée, ainsi que la description d'un oscillateur harmonique et des opérateurs jouant un rôle important dans sa description (opérateurs de création et annihilation de quanta, de déplacement de l'oscillateur dans son espace de phase, opérateur parité du nombre de quanta). L'interaction entre un qubit et un oscillateur a été analysée dans le cadre du modèle entièrement soluble de Jaynes et Cummings et les propriétés du système habillé « qubit plus oscillateur » ont été rappelées. Deux systèmes réalisant ce modèle simple ont été décrits. Il s'agit d'une part du système étudié en électrodynamique en cavité (atome de Rydberg couplé à un mode du champ dans une cavité) et d'autre part du cas d'un ion piégé interagissant avec des lasers (le qubit est réalisé par deux niveaux d'énergie interne de l'ion et l'oscillateur est un mode de vibration de l'ion dans le piège). Le couplage de deux qubits à l'oscillateur permet de réaliser des opérations d'intrication de deux atomes ou de deux ions. Inversement, le couplage à un qubit de deux modes du champ ou de deux modes de vibration mécanique permet d'intriquer deux oscillateurs. Des expériences d'électrodynamique en cavité et d'ions piégés réalisant ces opérations élémentaires ont été rappelées.

La suite de la leçon a rappelé les différentes méthodes tomographiques permettant de reconstituer des états de qubits ou d'oscillateurs quantiques. La tomographie de qubits basée sur la mesure de valeurs moyennes d'opérateurs de Pauli a été décrite. La mesure de la distribution du nombre de quanta d'un oscillateur fondée sur l'analyse temporelle des oscillations de Rabi d'un qubit résonnant couplé à l'oscillateur a aussi été rappelée, ainsi que la mesure non destructive du nombre de photons basée sur l'étude des déphasages induits par un couplage non-résonnant à des qubits couplés successivement à un mode du champ dans une cavité. La reconstruction complète de l'état de l'oscillateur s'obtient en effectuant des mesures de distribution du nombre de quanta sur des états déplacés de l'oscillateur, pour un

ensemble de déplacements d'amplitudes et de phases variées. Des expériences effectuant ces reconstructions sur des états cohérents, des états de Fock et des états « chats de Schrödinger » ont été décrites. Ce survol des cours antérieurs s'est conclu par le rappel de méthodes de préparation d'états non classiques d'un oscillateur, en distinguant les méthodes déterministes permettant de préparer certains états par une suite pré-établie d'opérations unitaires couplant l'oscillateur à un plusieurs qubits et les méthodes non-déterministes préparant ces états par projection aléatoire résultant de mesures quantiques. La leçon s'est achevée par une introduction aux cours suivants, résumant brièvement leur contenu.

La physique de la jonction Josephson

Dans la deuxième leçon, nous avons présenté les notions générales de physique de la matière condensée indispensables pour comprendre l'effet Josephson, qui joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des qubits supraconducteurs. Sous sa forme la plus simple, ce qubit est constitué de deux îles supraconductrices séparées par une barrière isolante. Une analyse qualitative de l'appariement des électrons en paires de Cooper dans le métal supraconducteur a été développée. Ces paires, considérées comme des bosons composites, passent par effet tunnel à travers la barrière constituant la jonction. L'effet Josephson apparaît ainsi comme une propriété d'un double condensat dont les deux parties sont couplées par un terme d'échange de paires. Nous avons établi le hamiltonien des paires de Cooper dans ce système, qui présente de grandes analogies avec celui décrivant la dynamique d'un double condensat de Bose-Einstein atomique, ayant fait l'objet de cours antérieurs en 2005-2006. Les équations de Hamilton de ce système permettent de retrouver les effets Josephson continu et alternatif bien connus. Ce hamiltonien fait apparaître comme variables canoniquement conjuguées la charge de la jonction (ou la différence du nombre de paires entre les deux îles) et la différence de la phase macroscopique entre les deux parties. En considérant ces variables comme des opérateurs quantiques, on obtient un hamiltonien d'oscillateur non-linéaire dont les deux niveaux les plus profonds sont ceux d'un qubit résonnant à quelques gigahertz. Ce hamiltonien peut être interprété comme celui d'une particule fictive dans un puits de potentiel, les énergies cinétiques et potentielles de la particule étant associées respectivement à l'énergie capacitive et inductive de la jonction. Nous avons ensuite décrit rapidement les effets magnétiques associés à la dynamique d'une jonction supraconductrice en analysant le fonctionnement d'un SQUID, système interférentiel incluant des jonctions Josephson supplémentaires permettant d'effectuer la lecture de l'état du qubit.

Les qubits supraconducteurs

La troisième leçon a décrit de façon plus précise les qubits supraconducteurs basés sur l'effet Josephson. Pour manipuler l'état du qubit et le détecter, il faut insérer la jonction dans des circuits extérieurs. Le contrôle de la fréquence du qubit et sa détection peuvent se faire en envoyant un courant continu dans la jonction ou de façon inductive, en créant un flux magnétique à travers le circuit incluant la jonction. Il en résulte une modification du hamiltonien du système qui présente un minimum local autour duquel la particule effective représentant le qubit est piégée.

On réalise ainsi un « qubit de phase » (*phase qubit*) dont la fréquence est ajustée finement en jouant sur l'intensité du courant continu ou du flux de contrôle. La détection de l'état du qubit se fait en amenant son état excité au voisinage du sommet d'une barrière de potentiel associée au hamiltonien effectif, ce qui permet à la particule fictive représentant le qubit d'échapper au puits dans lequel elle est confinée. La variation brusque de la phase quantique (ou du flux magnétique) qui en résulte est détectée par un SQUID couplé au circuit du qubit. Nous avons également décrit comment réaliser des transformations unitaires de l'état du qubit en le couplant à travers une capacité à des impulsions radiofréquences. Le couplage capacitif de deux jonctions pour réaliser des portes logiques a été aussi analysé, ainsi que le couplage d'un qubit à un circuit de type LC constituant un résonateur radiofréquence. On obtient ainsi un système analogue à celui de l'électrodynamique quantique en cavité des expériences de l'ENS, le qubit supraconducteur remplaçant l'atome de Rydberg et le circuit LC la cavité supraconductrice. Dans les qubits de phase, la phase (ou le flux) sont relativement bien définis et la charge est la variable « floue » présentant de grandes fluctuations. Nous avons conclu la leçon en décrivant brièvement le principe des qubits de charge, dans lesquels c'est au contraire la charge qui est la variable précise et la phase la variable floue. Nous avons également décrit le principe du qubit de flux (*flux qubit*) dans lequel la particule effective oscille par effet tunnel entre deux puits symétriques.

L'information quantique avec des qubits de phase

Dans la quatrième leçon, nous avons montré comment le qubit supraconducteur de phase pouvait être utilisé dans des opérations de traitement quantique de l'information. Après avoir brièvement décrit la relaxation des qubits supraconducteurs en analysant quelques causes essentielles de dissipation et en donnant les ordres de grandeur de leur temps de cohérence, nous avons décrit des expériences réalisées dans le groupe de John Martinis à l'université de Californie à Santa Barbara. Nous avons commencé par décrire quelques dispositifs concrets couplant entre eux deux ou plusieurs qubits, donnant une idée de la complexité des expériences actuellement possibles. Nous avons ensuite décrit plus en détail une expérience de manipulation d'un qubit isolé (observation des oscillations de Rabi), puis une expérience ayant réalisé l'intrication de deux qubits, une opération qui combinée à des rotations des états des qubits, revient à la réalisation d'une porte logique de type « *control-not* ». Nous avons aussi montré comment la mesure indépendante des qubits à l'aide de SQUIDS permet de reconstruire leur opérateur densité par tomographie quantique. Nous avons enfin décrit une expérience ayant permis de tester les inégalités de Bell pour la première fois dans un système mésoscopique.

La synthèse et la reconstruction d'états en électrodynamique des circuits

La cinquième leçon a été consacrée à la description d'expériences d'électrodynamique des circuits ayant permis à l'équipe de John Martinis de synthétiser des états arbitraires d'un résonateur radiofréquence et des états intriqués de deux résonateurs. Nous avons commencé par décrire la préparation déterministe d'états de Fock qui consiste à coupler de façon répétée le résonateur radiofréquence

à un qubit échangeant un quantum d'énergie avec lui, avant d'être réinitialisé dans son état excité. Les photons sont ainsi injectés un à un dans l'oscillateur jusqu'à ce que l'état cherché soit généré. Cet état est ensuite détecté en observant l'oscillation de Rabi du qubit, à une fréquence pure proportionnelle à la racine carrée du nombre de photons. Nous avons ensuite montré comment la méthode a été généralisée à la synthèse d'états arbitraires du résonateur radiofréquence, définis par leur développement sur la base des états de Fock. Suivant la procédure établie par Law et Eberly et déjà utilisée en physique des ions piégés, on commence par déterminer la suite des opérations permettant, en partant de l'état cible que l'on cherche à générer, à parvenir au vide en supprimant les quanta un à un dans le résonateur. Il ne reste plus qu'à appliquer ces opérations en sens inverse pour générer l'état cible en partant du vide. Les opérations que l'on combine sont des rotations individuelles et des déphasages des qubits ainsi que des impulsions d'oscillations de Rabi transférant de l'énergie entre le qubit et l'oscillateur. Une fois l'état généré, il est reconstruit par tomographie quantique, soit sous forme d'opérateur densité dans la base des états de Fock, soit sous forme de fonction de Wigner. Diverses superpositions cohérentes d'états de Fock ont ainsi été produites et reconstruites. La fin de la leçon a été consacrée à la description d'expériences récentes de génération et de reconstruction d'états intriqués de deux résonateurs radiofréquence. L'expérience implique deux circuits Josephson couplés à trois résonateurs coaxiaux. L'un de ces résonateurs (noté C) sert à intriquer les deux circuits Josephson, qui à leur tour, sont utilisés pour intriquer les deux autres résonateurs (notés A et B). L'expérience utilise trois niveaux de chaque circuit Josephson qui se comporte ainsi comme un « qutrit » plutôt que comme un qubit. Des états de type NOON dans lesquels N photons (avec $N = 1, 2$ et 3) se trouvent dans une superposition cohérente de l'état où ils sont tous dans le résonateur A avec l'état où ils sont tous dans le résonateur B ont ainsi été préparés et reconstruits. Nous avons comparé ces expériences avec celles réalisées antérieurement en électrodynamique quantique en cavité et en physique des ions piégés.

La manipulation et la synthèse par effet Zénon dynamique des états d'un oscillateur quantique

La sixième leçon a été consacrée à la description de la manipulation des états du rayonnement par effet Zénon dynamique dans un dispositif d'électrodynamique quantique en cavité avec des atomes de Rydberg. L'effet Zénon et ses variantes correspondent à une inhibition de l'évolution cohérente d'un système quantique soumis à une perturbation répétée. Il peut s'agir du couplage à un appareil de mesure qui a pour effet de projeter périodiquement le système dans son état initial, ou encore de l'application répétée d'impulsions qui brouillent les phases quantiques responsables de l'évolution du système et bloquent son évolution (méthodes dites « *bang-bang* »). Une analyse de ces effets a déjà été présentée dans le cours 2004-2005 (4^e leçon). Au-delà de son aspect paradoxal (« observer un système l'empêche d'évoluer »), l'effet Zénon peut servir à manipuler le hamiltonien d'un système pour préparer certains états quantiques. On peut l'utiliser pour figer l'évolution de certains états, ou bloquer cette évolution dans un sous-espace de l'espace des états alors que d'autres états, situés à l'extérieur de ce sous-espace, peuvent évoluer librement. Dans le cas d'un oscillateur harmonique, on peut ainsi

réaliser des sortes de « pinces » agissant dans l'espace des phases (« *phase space tweezers* »), qui permettent de manipuler et de synthétiser des états largement arbitraires. La leçon a commencé par rappeler les caractéristiques de l'effet Zénon sous ses différentes formes. Nous avons ensuite décrit en détail un projet d'expérience visant à restreindre l'évolution d'un champ dans une partie de son espace de Hilbert en effectuant des mesures répétées particulières de son nombre de photons. Une mesure effectuée sur un atome de Rydberg dans la cavité doit permettre de décider si le champ contient ou non un nombre de photons bien défini. Cette mesure binaire, si elle est répétée à intervalles réguliers, doit empêcher le champ d'atteindre ce nombre limite de photons. Si la cavité initialement vide est alimentée par une source classique, le champ cohérent qui se bâtit voit le support de sa fonction de Wigner réfléchi par une barrière correspondant à cette valeur limite et le champ reste confiné dans l'espace des phases à l'intérieur d'un cercle d'exclusion dont il ne peut sortir. Lorsque le support de sa fonction de Wigner approche de la limite, une composante déphasée de 180 degrés apparaît, correspondant à la création d'un état à deux composantes de type « chat de Schrödinger ». L'amplitude du champ oscille ainsi à l'intérieur du cercle d'exclusion, en se dédoublant périodiquement pour créer des états de type « chat » à l'existence transitoire. Si le support du champ cohérent est initialement à l'extérieur du cercle d'exclusion, il ne peut pas y pénétrer et le couplage avec une source classique conduit le champ à « éviter » le cercle d'exclusion avec, à nouveau, la possibilité de création d'états transitoires de type « chat ». Si le champ est initialement dans un état « chat », superposition de deux états cohérents, il doit être possible de piéger une des composantes dans un cercle d'exclusion et, en couplant la cavité à une source classique, de déplacer la composante libre tout en immobilisant la composante « piégée ». En variant adiabatiquement le centre du cercle d'exclusion réalisant ce piège, on doit pouvoir fabriquer de véritables « pinces » dans l'espace des phases permettant de déplacer indépendamment différentes composantes cohérentes. De telles pinces, maniées convenablement, devraient permettre de synthétiser des superpositions arbitraires d'états cohérents ne se recouvrant pas. Nous avons discuté dans la leçon des possibilités pratiques de réaliser de telles expériences, ce qui nécessite un montage expérimental nouveau. Un atome de Rydberg doit rester dans la cavité pendant un temps de l'ordre de la milliseconde, de façon à permettre des mesures précises du spectre de cet atome « habillé » par le champ de la cavité. Pour réaliser ces expériences, nous envisageons le couplage de la cavité supraconductrice à une fontaine atomique d'atomes ultra-lents, un dispositif dont nous avons décrit le principe dans cette leçon.

La préparation et la protection d'états d'un oscillateur harmonique par rétroaction quantique

*Dans la septième et dernière leçon, nous avons décrit le principe d'une expérience visant à préparer et protéger de la décohérence un état non classique d'un oscillateur harmonique, en utilisant une méthode de rétroaction quantique (*quantum feedback*). Le contrôle des systèmes physiques dans notre vie quotidienne repose en général sur des méthodes de rétroaction classiques. La température d'un bâtiment, la vitesse d'un véhicule, l'altitude d'un avion sont mesurées par des sondes dont les données sont envoyées à des ordinateurs qui évaluent la correction à apporter pour ramener*

les quantités contrôlées à leur valeur optimale. Étendre ce principe au monde microscopique est essentiel pour le traitement quantique de l'information qui utilise comme briques élémentaires des atomes réels ou artificiels et des photons. La difficulté fondamentale de la rétroaction quantique est due au fait que la mesure du système, en elle-même, perturbe le système contrôlé d'une façon aléatoire. L'expérience, proposée dans un travail réalisé en collaboration entre le groupe d'électrodynamique quantique en cavité de l'ENS et l'équipe de Pierre Rouchon à l'École des mines, consiste à préparer et protéger des états de Fock « cibles » déterminés dans une cavité. La procédure implique des boucles d'opérations contrôlées par ordinateur. À chaque pas, un atome de Rydberg effectue une mesure POVM non destructive (QND) du champ et l'ordinateur détermine l'état du champ conditionné au résultat de la mesure, ainsi que le recouvrement entre cet état et l'état cible. En fonction de cette information, l'ordinateur calcule l'amplitude du champ à ajouter dans la cavité pour maximiser ce recouvrement et commande l'injection de ce champ. Après quelques dizaines d'itérations, le champ doit converger vers l'état cible. Une fois cet état atteint, la poursuite de la procédure doit permettre de détecter les sauts quantiques du champ et corriger leurs effets, protégeant ainsi l'état de Fock contre la décohérence. Nous avons commencé par rappeler comment s'effectue la mesure QND du nombre de photons, puis nous avons analysé la procédure de cet asservissement quantique et avons présenté des simulations numériques. Au moment de la leçon, l'expérience était en préparation dans le groupe de recherche associé à la chaire de physique quantique, au laboratoire Kastler-Brossel de l'ENS. Les premiers résultats ont été obtenus quelques jours après la fin du cours. Des détails sur cette expérience sont donnés dans la dernière partie de ce résumé de cours et travaux

ENSEIGNEMENT DU COLLÈGE DE FRANCE « HORS LES MURS »

L'enseignement donné à Rio de Janeiro en mars-avril 2011 a consisté en six leçons sur l'estimation et la reconstruction d'états en information quantique données à des étudiants et enseignants chercheurs du département de physique de l'université fédérale de cette ville. Ayant rappelé que différentes méthodes de préparation, de reconstruction et de contrôle d'états quantiques ont été récemment démontrées expérimentalement ou proposées, je me suis attaché à décrire les études de mon groupe en électrodynamique quantique en cavité, ainsi que certaines expériences d'électrodynamique des circuits qui leur ressemblent par de multiples aspects. Le contenu des leçons a été le suivant :

Première leçon (14 mars 2011) : Une revue de la théorie de la mesure quantique, illustrée par la description du comptage non-destructif de photons (méthode QND) en électrodynamique quantique en cavité.

Deuxième leçon (16 mars 2011) : Une revue de l'effet Zénon quantique, décrivant comment on peut utiliser des mesures répétées pour manipuler des états non classiques d'un oscillateur.

Troisième leçon (21 mars 2011) : Une analyse de la rétroaction quantique : comment utiliser des procédures de rétroaction avec des mesures QND faibles pour amener un système quantique vers un état cible et le protéger de la décohérence.

Quatrième leçon (23 mars 2011) : Une étude de l'estimation et de la reconstruction d'états basée sur des idées importées de la théorie classique de l'estimation et illustrée par la description de reconstructions d'états non-classiques en électrodynamique quantique en cavité.

Cinquième leçon (4 avril 2011) : Une introduction à l'électrodynamique des circuits présentant de façon simple la physique des jonctions Josephson couplées à des résonateurs LC.

Sixième leçon (6 avril 2011) : Description d'expériences récentes en électrodynamique des circuits ayant synthétisé et reconstruits des états arbitraires d'un résonateur radiofréquence.

SÉMINAIRES

Une série de sept séminaires accompagnait le cours du Collège de France à Paris en le complétant et en illustrant différents aspects. En voici la liste dans l'ordre où ils ont été donnés :

10 janvier 2011 : *Imaging and manipulating single atoms in a strongly correlated quantum system* (Stefan Kuhr, Institut Max Planck d'optique quantique, Garching, Allemagne).

17 janvier 2011 : *Mesurer la mesure : comment utiliser l'électrodynamique en cavité pour détecter un qubit atomique avec une rétroaction minimale* (Jakob Reichel, LKB/ENS/UPMC).

24 janvier 2011 : *Optomécanique avec des micro-cavités de grande finesse* (Samuel Deléglise, École polytechnique de Lausanne).

31 janvier 2011 : *What can a single atom do that many atoms cannot ?* (Peter Toschek, Université de Hambourg).

7 février 2011 : *Entanglement and Decoherence: From Einstein and Schrödinger to Quantum Information* (Luiz Davidovich, Université fédérale de Rio de Janeiro, Brésil).

21 février 2011 : *Dissipation: a new tool in quantum information processing* (Ignacio Cirac, Institut Max Planck d'optique quantique, Garching, Allemagne).

28 février 2011 : *Refroidissement d'un atome individuel par rétroaction sur des photons uniques* (Alexei Ourjoumtsev, Institut d'optique, Palaiseau).

CONFÉRENCES ET AUTRES SÉMINAIRES DE SERGE HAROCHE

En dehors de ses cours au Collège de France et à Rio de Janeiro, S. Haroche a donné les séminaires, cours et conférences suivants entre juillet 2010 et juin 2011 :

Août 2010 : Symposium « Présent et futur de la mécanique quantique » de la Fondation Bunge Y. Born, Buenos Aires, Argentine : « Fundamental tests in Cavity Quantum Electrodynamics ».

Septembre 2010 : Symposium « Quantum Africa 2010 », Durban, Afrique du Sud : « Manipulation and control of non-classical field states in Cavity QED ».

Octobre 2010 : *International conference on quantum information and computation*, Stockholm, Suède : « Manipulation and control of non-classical field states in a cavity by quantum non-demolition measurements and quantum Zeno dynamics ».

Octobre 2010 : Conférence « Arrow of time and the problem of decoherence in closed solid-state quantum systems », IHP, Paris : « Generating, reconstructing and controlling non-classical states of radiation in a cavity by quantum non-demolition measurements ».

Novembre 2010 : Symposium « Fifty years in the light of the laser », Berlin, Allemagne : « Exploring the quantum nature of light in a photon box ».

Novembre 2010 : Cycle de conférences du Collège de France à Tunis. À l'université de Tunis : « Compter les photons sans les détruire : une nouvelle façon de voir ». À la bibliothèque nationale de Tunisie : « Atome et lumière : histoire de l'interaction entre la matière et le rayonnement ».

Février 2011 : Colloquium à l'École normale supérieure de Lyon : « *Tests fondamentaux de physique quantique dans une boîte à photons* ».

Avril 2011 : Colloquium à l'université de Sao Paulo, Brésil : « Exploring the quantum nature of light in a cavity ».

Avril 2011 : Séminaire à l'université de Sherbrooke, Canada : « Fundamental tests of quantum theory in a photon box ».

Avril 2011 : Colloquium à l'université McGill, Montréal, Canada : « Exploring the quantum nature of light in a cavity ».

Mai 2011 : Symposium « Entanglement, quantum information and the quantum to classical transition », Rome, Italie : « Playing with Schrödinger cats and other non-classical states of light in a cavity ».

Mai 2011 : Journée d'accueil des entrants au CNRS, La Rochelle : « Comment quelques idées simples ont conduit à des applications spectaculaires en physique atomique ».

Mai 2011 : *Distinguished lecturer* à l'Institut Lewiner, Technion, Haifa, Israël : 1) colloquium : « Fundamental tests of quantum physics with atoms and photons in a box » ; 2) deux séminaires : « Non destructive photon counting and quantum feedback experiments in Cavity Quantum Electrodynamics » et « State preparation and reconstruction in Cavity Quantum Electrodynamics : an experimental study of Schrödinger's cat ».

Mai 2011 : Colloquium à l'université de Tel Aviv (*Sackler Lecturer*) : « Fundamental test of quantum theory in a photon box ».

Juin 2011 : Conférence grand public à l'*International Science Day*, Turku, Finlande : « Light, atoms and colors : a long journey between Art and Science ».

Juin 2011 : *International Conference on quantum information*, Ottawa, Canada : « Non destructive field measurements and quantum feedback experiments in Cavity Quantum Electrodynamics ».

Juin 2011 : Conférence grand public aux journées de Pessac, Gironde : « Puissance et étrangeté de la physique quantique ».

INVITATION D'UN PROFESSEUR ÉTRANGER

Dans le cadre de la chaire de Physique quantique, Serge Haroche a invité le professeur Luiz Davidovich, de l'université fédérale de Rio de Janeiro qui a donné en février et mars 2011 une série de quatre conférences sur « Intrication, décohérence et métrologie quantique ». Ces leçons étaient centrées sur l'étude de la dynamique des systèmes intriqués sous l'effet du couplage avec leur environnement. Luiz Davidovich s'est particulièrement intéressé à la façon dont l'amortissement d'un système intriqué fait de plusieurs parties se comporte en fonction du temps et du nombre de ses composants. Il a décrit comment ce comportement affecte des applications au calcul quantique, à la téléportation et à la métrologie quantique. Dans la première leçon, il a commencé par une revue du concept d'intrication, de sa caractérisation, des méthodes qui permettent de l'augmenter. Il a introduit le concept d'intrication liée (*bound entanglement*) et il a décrit les principales mesures

de l'intrication utilisées dans la littérature scientifique, donnant un certain nombre d'exemples provenant d'expériences récentes. La deuxième leçon a été consacrée à la description des systèmes ouverts, à la définition des canaux quantiques et des opérations de filtre quantique. Luiz Davidovich a parlé de la tomographie des processus quantiques et de la dynamique de l'intrication des systèmes de deux qubits en présentant des résultats théoriques et expérimentaux. La troisième leçon a porté sur la dynamique de l'intrication des systèmes à multiples parties. Il a introduit la métrologie quantique en parlant de la limite de Cramer-Rao et de l'information de Fisher. Il a discuté de la notion de « distinguabilité » des états et du rôle de l'intrication dans la métrologie quantique. La quatrième leçon s'est intéressée à la métrologie quantique en présence de bruit. Luiz Davidovich a présenté le formalisme général permettant d'évaluer la précision ultime de l'estimation des paramètres mesurés en métrologie quantique. Il a discuté de l'application de ce formalisme aux interféromètres optiques et atomiques. Ces conférences ont eu un grand succès, attirant un large public de physiciens de Paris et de la région parisienne. Elles ont également constitué un complément très utile aux leçons de la chaire de physique quantique de l'année 2009-2010 consacrées à l'analyse de l'estimation et de la reconstruction d'états quantiques.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE

Le travail de recherche de S. Haroche se déroule au sein du laboratoire Kastler Brossel (LKB) de l'École normale supérieure. Il y co-dirige, avec ses collègues Jean-Michel Raimond (professeur à Paris VI) et Michel Brune (directeur de recherche au CNRS) une équipe de chercheurs et d'étudiants (groupe d'électrodynamique quantique en cavité). Depuis le début 2010, ce projet est soutenu par un contrat européen de l'ERC (projet DECLIC, acronyme pour *Decoherence of Light in Cavities*) et par un contrat de l'ANR.

Le thème général des recherches du groupe porte sur l'étude des effets quantiques (intrication, complémentarité et décohérence) et de leurs applications dans des systèmes constitués d'atomes en interaction avec des photons. Un rapport d'activité complet est rédigé tous les deux ans pour le comité national du CNRS et contient une analyse détaillée des problèmes scientifiques abordés par le groupe et un bilan des résultats nouveaux.

Expérience de rétroaction quantique

Un des buts essentiels poursuivis cette année a été la mise au point d'une méthode de rétroaction quantique pour la préparation d'états de Fock, avec un nombre de photons bien déterminé. Dans cette expérience, nous envoyons des atomes de Rydberg circulaires, un par un, dans une cavité supraconductrice de très haute qualité. Ces atomes, non-résonnants avec le mode, subissent, lors de leur interaction avec lui, un déplacement lumineux proportionnel au nombre de photons. Ce déplacement est détecté par un interféromètre atomique de type Ramsey. Chaque atome détecté fournit une information binaire, très partielle, sur l'intensité du champ. Nous utilisons, en temps réel, cette information pour calculer l'état quantique le plus probable du champ et déterminer l'amplitude d'un petit champ cohérent qui,

injecté dans la cavité par une source classique, conduit au mieux celle-ci vers l'état souhaité. Ce principe contient toutes les composantes d'une boucle de rétroaction, avec une sonde quantique, l'atome, un contrôleur et un actuateur classiques (le calculateur temps réel et la source d'injection). Nous avons montré par des simulations en 2009 que ce schéma est efficace. Il peut préparer un état de Fock à la demande. Il le protège aussi de la décohérence. Les sauts quantiques de l'intensité sont détectés efficacement et rapidement compensés.

L'ensemble des calculs d'état et les décisions associées doivent être faits en temps réel. Nous avons pu réaliser cet objectif avec un système AD-Win, qui possède les interfaces et la capacité de calcul nécessaires, au prix d'un code complexe très soigneusement optimisé. L'expérience a récemment fourni des résultats tout à fait conformes aux attentes théoriques. Nous avons pu effectivement préparer efficacement des états de Fock à la demande et compenser les sauts quantiques dus à l'amortissement de la cavité. Il s'agit de la première réalisation d'une rétroaction quantique en régime permanent, qui ouvre de nombreuses possibilités pour le contrôle d'états non-classiques et pour l'information quantique. L'article présentant ces résultats vient d'être accepté par la revue *Nature*.

Adaptation du montage d'électrodynamique quantique à l'utilisation d'atomes froids

Nous avons décidé de construire un nouveau montage expérimental, dans lequel les atomes lents d'un jet en configuration fontaine seront préparés dans l'état circulaire à l'intérieur même de la cavité et détectés aussi dans la cavité, après un temps d'interaction cohérente avec le mode pouvant atteindre une dizaine de millisecondes. Nous pourrions ainsi préparer par exemple des états « chat de Schrödinger » impliquant quelques dizaines de photons et mesurer leur décohérence, ou réaliser des marches aléatoires quantiques pour la phase du champ pilotée par l'état d'un atome. Ce cryostat est en commande, les composantes essentielles (préparation et détection des atomes circulaires) seront mises au point dans un cryostat de test provisoire.

Préparation déterministe d'atomes de Rydberg

Un certain nombre d'expériences demandent de pouvoir disposer d'atomes à la demande, et non pas d'une statistique poissonnienne d'atomes dans un jet comme c'est le cas actuellement. Pour la préparation déterministe d'atomes de Rydberg, nous avons finalement opté pour l'utilisation du blocage dipolaire. Nous avons montré par des simulations numériques détaillées que l'excitation laser de quelques centaines d'atomes confinés dans un volume à l'échelle du micron produit de façon déterministe un atome de Rydberg et un seul, en raison des fortes interactions dipolaires entre ces atomes très excités. Les conditions de piégeage sont compatibles avec celles que nous avons déjà réalisées avec des puces à atomes supraconductrices. Pour exciter les atomes de Rydberg dans le piège, nous envisageons une excitation en raie étroite de la transition à deux photons vers les niveaux de Rydberg. Nous avons préparé les lasers nécessaires et nous mettons en place une nouvelle puce, permettant d'obtenir facilement le fort confinement requis.

Exploration théorique de nouveaux procédés de manipulation du champ dans la cavité

En parallèle avec ces expériences, nous avons poursuivi l'exploration théorique des mécanismes de rétroaction quantique, et, plus généralement, des expériences rendues possibles par le contrôle en temps réel et la disponibilité à court terme de temps d'interaction très longs. Nous avons en particulier exploré la rétroaction avec des atomes résonants comme actuateurs et démontré son efficacité remarquable. Le groupe a montré également, en collaboration avec Pierre Rouchon, de l'École des mines et Alain Sarlette, de Liège, qu'on peut protéger des états non-classiques par des techniques d'ingénierie de l'environnement. Le principe est d'imposer au système une forte relaxation, produite par un environnement contrôlé. Les états stables (états pointeurs) de cette relaxation sont les états non classiques à protéger. Le réservoir que nous proposons est constitué d'atomes traversant la cavité un par un. Ils interagissent de façon complexe avec elle, par une interaction résonnante précédée et suivie de deux interactions dispersives conjuguées. Nous avons montré qu'on stabilise ainsi efficacement, en dépit de la relaxation ordinaire de la cavité, une variété d'états non classiques, comprenant en particulier des « chats de Schrödinger », superpositions quantiques de composantes cohérentes multiples. Les simulations numériques sont très encourageantes et nous pouvons dès maintenant songer à des mises en évidence avec le dispositif actuel.

Nous avons aussi montré, en collaboration avec S. Pascazio et P. Facchi, de l'université de Bari, que le nouveau montage, avec des atomes presque au repos dans la cavité, se prête à merveille à l'exploration de la dynamique de Zénon quantique. Elle généralise l'effet Zenon quantique ordinaire, en confinant l'évolution d'un système dans un sous-espace propre d'une observable mesurée fréquemment à l'échelle de temps d'évolution. Nous avons ainsi montré qu'on peut préparer des états non classiques intéressants, et, en particulier, synthétiser et manipuler des superpositions complexes de composantes cohérentes distinctes.

PUBLICATIONS DU GROUPE D'ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE EN CAVITÉ

Haroche S., *Jongler avec la lumière. Une exploration du monde quantique*, De vive voix, 2010.

Raimond J.-M., Sayrin C., Gleyzes S., Dotsenko I., Brune M., Haroche S., Facchi P. et Pascazio S., « Phase space tweezers for tailoring cavity fields by quantum Zeno dynamics », *Phys. Rev. Lett.*, 105, 2010, 213601.

Sarlette A., Raimond J.-M., Brune M. et Rouchon P., « Stabilization of non-classical states of the radiation field in a cavity by reservoir engineering », *Phys. Rev. Lett.*, 107, 2011, 010402.

Sayrin C., Dotsenko I., Zhou X., Peaudecerf B., Rybarczyk T., Gleyzes S., Rouchon P., Mirrahimi M., Amini H., Brune M., Raimond J.-M. et Haroche S., « Real-time quantum feedback prepares and stabilizes photon number states », *arXiv*, 110, 2011, 1107.4027 (manuscrit accepté par *Nature* en juillet 2011).